УДК 669.017.3 : 539.26

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ

В.Д. Клопотов, В.П. Нестеренко

Томский политехнический университет
E-mail: VKlopotov@mail2000.ru

С помощью численного моделирования решена нестационарная задача распространения тепла в основной плоскости резца при различной интенсивности тепловых потоков, образующихся в зоне контакта режущего клина с обрабатываемым материалом. Исследовано распределение температурного поля вдоль режущей кромки резца при минимальном износе и при износе, близкому к критическому. Определены границы износа режущего инструмента, при достижении которых невозможно эффективное его использование.

Введение

При проектировании состава и свойств инструментальных материалов чрезвычайно важной является информация о вероятном распределении температур в режущем клине. Исследованию вопроса распределения тепла на передней и задней поверхности режущих инструментов посвящено довольно много теоретических и практических работ [1, 2]. Вместе с тем, износ режущего инструмента тесным образом связан и с распределением тепловых напряжений вдоль режущей кромки. В связи с этим моделирование распределения температурных полей на этом участке может предоставить важные дополнительные сведения, необходимые для конструирования свойств инструментальных материалов, а также для оптимизации процесса резания. Для достижения обозначенных целей решалась нестационарная задача распространения тепла в плоскости резца. При моделировании предполагалось, что ведется обработка стали Х18Н10Т сменной твердосплавной пластинкой из твердого сплава ВК8, имеющей форму прямоугольника размером $p \times d$ (рис. 1), в условиях прямоугольного резания. Переменным параметром при моделировании являлся тепловой поток в рабочей части режущей кромки, который зависит от степени ее износа.

Обоснование физической модели

Нагрев режущей кромки резца происходит в результате: работы деформации в зоне стружкообразования, трения на площадке контакта между стружкой и поверхностью инструмента, трения на главной и вспомогательной задних поверхностях. Основным источником тепла, возникающим на режущей кромке в начальный период резания, является работа деформации, совершающаяся в зоне стружкообразования, и работа трения, осуществляющаяся при трении стружки с передней поверхностью. Суммарный тепловой поток, возникающий от этих источников тепла, сосредоточен на режущей кромке в области, помеченные точками В и С, рис. 1. Из области В происходит интенсивный отвод тепла в режущую пластинку, а из точки С – в режущую пластину и обрабатываемую поверхность детали. Вследствие этого представляется важным исследование распределения температурного поля на режущей кромке участка ВС.

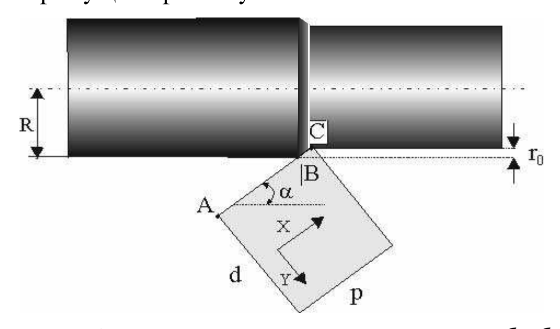


Рис. 1. Схема взаимного расположения резца и обрабатываемой детали во время резанья

По мере износа режущего инструмента (по задней поверхности) будет происходить перераспределение доли теплового потока на режущей кромке от каждого из отмеченных выше источников.

Износ режущего инструмента, например, изготовленного из твёрдого сплава ВК-8, при обработке хромоникелевой стали Х18Н10Т в экономичном режиме резания, происходит, как правило, по задней поверхности. Наибольшему износу подвергается периферийная область режущей кромки, а также часть резца, находящаяся в области его вершины. Вследствие этого вклад в повышение температуры на режущей кромке от тепловыделения в результате трения детали по задней поверхности резца в точках В и С будет возрастать и станет сопоставимым с вкладом тепла, генерируемого в зоне стружкообразования.

Износ режущей кромки по задней поверхности в области периферии, точка В, происходит вследствие контакта её с поверхностью детали, имеющей наибольшую линейную скорость. Износ режущей кромки у вершины резца, точка А, является следствием износа вспомогательной задней поверхности. Вследствие указанных причин соотношение между подводом и отводом тепловых потоков к режущей кромке в области В и С изменится. Нарастающая величина фасок износа в точках В и С обусловливает радикальное перераспределение тепла вдоль режущей кромки, когда температура в ее периферийных частях начинает интенсивно увеличиваться. Процесс резания с этого момента может завершиться разрушением режущей пластинки.

В качестве переменного фактора при расчетах принимали тепловые потоки, соответствующие различной степени износа режущей кромки.

Учитывалась также зависимость тепловыделения на участке ВС от линейной скорости, которая прямо пропорциональна радиусу R обрабатываемой детали. Радиус r на участке ВС является функцией координаты x:

$$r(x)=R-(x-x_r)\cdot\sin\alpha,$$

где x_r – координата x точки В, x и y – пространственные координаты.

Математическая постановка задачи

Нестационарный процесс распространения тепла в пластине описывается уравнением:

$$c_p\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\lambda\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right), \qquad (1)$$

где T – температура, c_p – теплоемкость, ρ – плотность вещества, λ – теплопроводность, t – время. Свойства вещества c_p, ρ, λ зависят от температуры. Их функциональная зависимость описана в аналитическом виде с помощью метода наименьших квадратов [3].

Рассмотрим область П ($0\le x\le p$; $0\le y\le d$; $0\le t\le\Theta$). В начальный момент времени, при $t=0$, будем считать, что температура в заданной области распределена равномерно,

$$T(x,y)=T_0.$$

Граничные условия

1. Пусть координаты точки В (рис. 1) будут $x=x_r$, $y=0$, тогда на границе $0\le x<x_r$ и $y=0$ действует условие

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha_v(T_v-T), \qquad (2)$$

где α_v – коэффициент теплоотдачи, T_v – температура окружающей среды.

При $x_r\le x\le p$ и $y=0$

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial y}=-q(x), \qquad (3)$$

где $q(x)$ – тепловой поток, являющийся функцией координаты x.

2. На границе $y=d$; $0\le x\le p$ действует условие

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{T_c-T}{R_T}. \qquad (4)$$

T_c – температура детали, в которой закреплен режущий инструмент; R_T – термическое сопротивление.

3. При $x=0$; $0\le y\le d$ и $x=p$; $0<y\le d$

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial x}=\frac{T_c-T}{R_T}. \qquad (5)$$

Численная аппроксимация

Для практической реализации описанного процесса построим численную модель определения температурного поля в резце. Применим экономичную разностную схему расщепления. Разностную аппроксимацию ур. (1–5) выполним в виде удобном для применения метода прогонки [4].

Заменим непрерывную функцию $T(x,y,t)$ на дискретную $T_{i,\kappa}^{j}$, где i, κ – номера узлов сетки пространственных координат x и y, j – номер временного слоя.

Шаг по временной координате вычисляется по формуле:

$$\tau = t_{j+1} - t_j.$$

По координатам x и y выберем равномерную сетку с шагом, соответственно

$$h = \frac{p}{n-1} \quad \text{и} \quad l = \frac{d}{m-1},$$

n и m – число шагов по координатам x и y.

Ур. (1) расщепим на два одномерных: по координате y:

$$c_{ik}\rho_{ik}\frac{T_{ik}^{j+1/2} - T_{ik}^{j}}{\tau} = E_1 T_{ik}^{j+1/2}, \qquad (6)$$

и по координате x:

$$c_{ik}\rho_{ik}\frac{T_{ik}^{j+1} - T_{ik}^{j+1/2}}{\tau} = E_2 T_{ik}^{j+1}. \qquad (7)$$

E_1 и E_2 – операторы:

$$E_1 T_{ik}^{j+1/2} = \frac{1}{l^2}[\lambda_{ik+1}(T_{ik+1}^{j+1/2} - T_{ik}^{j+1/2}) - \lambda_{ik}(T_{ik}^{j+1/2} - T_{ik-1}^{j+1/2})],$$

где $\lambda_{ik} = \lambda[0,5(T_{ik-1}^{j} + T_{ik}^{j})]$;

$$E_2 T_{ik}^{j+1} = \frac{1}{h^2}[\lambda_{i+1k}(T_{i+1k}^{j+1} - T_{ik}^{j+1}) - \lambda_{ik}(T_{ik}^{j+1} - T_{i-1k}^{j+1})],$$

где $\lambda_{ik} = \lambda[0,5(T_{i-1k}^{j+1/2} + T_{ik}^{j+1/2})]$.

Системы (6–7) решаются методом прогонки.

Для системы (6) аппроксимированное граничное условие (2) примет вид:

$$\lambda_{i1}\frac{T_{i2}^{j+1/2} - T_{i1}^{j+1/2}}{l} = \alpha_v(T_v - T_{i1}^{j+1/2}).$$

Условию (3), будет соответствовать разностное уравнение:

$$\lambda_{i1}\frac{T_{i2}^{j+1/2} - T_{i1}^{j+1/2}}{l} = -q_i.$$

Граничное условие (4) с учетом разностной аппроксимации запишем так:

$$\lambda_{im}\frac{T_{im}^{j+1/2} - T_{im-1}^{j+1/2}}{l} = \frac{T_C - T_{im}^{j+1/2}}{R_T}.$$

Для системы (7) начальные коэффициенты прогонки найдем из граничного условия (5), которое после аппроксимации примет вид:

$$\lambda_{1k}\frac{T_{2k}^{j+1} - T_{1k}^{j+1}}{h} = \frac{T_{1k}^{j+1} - T_C}{R_T}.$$

Описанный алгоритм был реализован в виде программы для ПЭВМ на языке “ПАСКАЛЬ”, которая предусматривает расчет температурного поля в резце при заданном $q(x)$ до стационарного режима.

Результаты и обсуждение

С помощью программы, реализующей описанный алгоритм, были проведены расчеты температурного поля резца при различных тепловых потоках, возникающих в месте контакта резца с обрабатываемым материалом, что соответствует различным скоростным режимам резанья, рис. 2, 3. Наибольший интерес представляет распределение температурного поля на участке ВС, рис. 1, режущей кромки, непосредственно находящейся в контакте с обрабатываемым материалом. На рис. 2 этот участок соответствует интервалу x[9,5;12].

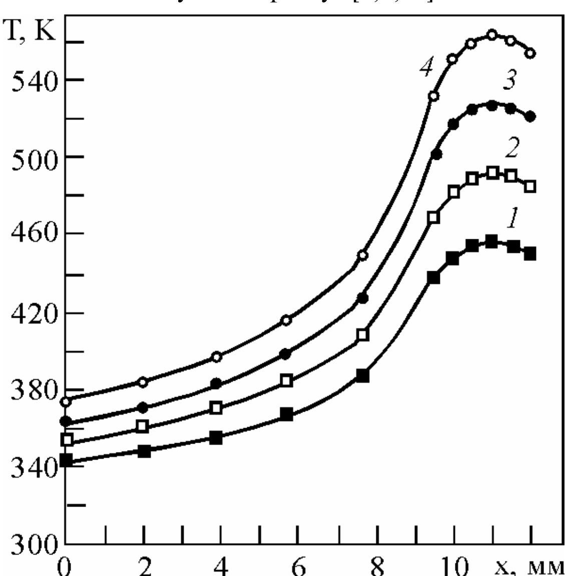


Рис. 2. *Температурная зависимость по длине режущей кромки резца при различных тепловых потоках в зоне контакта режущего клина с обрабатываемым материалом: 1) 40; 2) 50; 3) 60; 4) 70 кВт/см²*

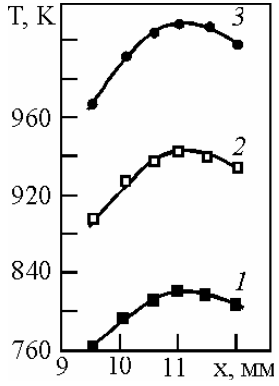


Рис. 3. *Температурная зависимость по длине рабочего участка ВС режущей кромки резца при тепловых потоках: 1) 150; 2) 200; 3) 250 кВт/см²*

Из этого рисунка видно, что профиль температур на этом участке не является линейным, а наибольшая температура достигается на некотором расстоянии от крайней точки С резца. При сравнительно небольших тепловых потоках, соответствующих малым скоростным режимам обработки, температурный перепад между максимальным значением и температурой в точке С, рис. 2, не превышает 10°, а для точки В – 30°. На рис. 3 представлен температурный профиль участка ВС при более высоких тепловых потоках, соответствующих критическим скоростям обработки для данного типа резцов. Температурный перепад на этом участке может составлять 90...100°. При таких температурных режимах возможно образование микротрещин вдоль режущей кромки [1, 2] и, как следствие, ускоренное разрушение резца. Результаты расчетов показывают, что появление микротрещин, наиболее вероятно в области с наибольшей температурой, т.е. в средней части рабочего участка резца.

В процессе работы наибольший износ резца происходит в точках В и С [2], что приводит к увеличению теплового потока в этих точках, по сравнению со средним в несколько раз. Результаты моделирования такой ситуации приведены на рис. 4.

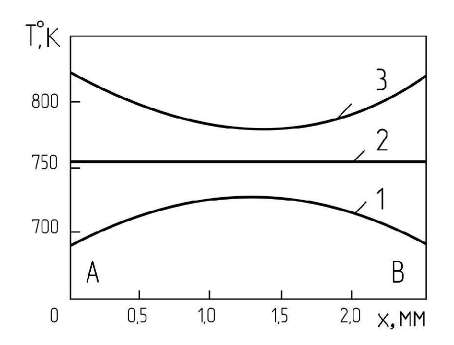


Рис. 4. *Распределение температуры вдоль рабочего участка режущей кромки резца ВС при износе его задней поверхности: 1) малом; 2) значительном; 3) критическом*

Были проведены расчеты температурного поля резца из твердого сплава ВК8, при резке хромоникелевой стали Х18Н10Т в начальный период резания, когда износ вдоль режущей кромки по задней поверхности невелик, и в период, когда износ достиг большой величины. Распределение температуры, представленной кривой 1, рис 4, соответствует условию, когда тепловой поток на режущей кромке формируется равномерно и зависит лишь от линейной скорости обрабатываемой детали. Распределение температуры, представленной кривой 2, соответствует условию, когда в результате износа кромки резца тепловой поток формируется неравномерно. В местах наибольшего износа, это точки А и В, тепловой поток возрастает в несколько раз.

Заключение

1. Для резцов, используемых для высокоскоростного резанья, должны применяться материалы, тепловые свойства которых (теплоемкость, теплопроводность, плотность, коэффициент линейного расширения) мало зависят от температуры. Это требование связано с тем, что перепад температур в 80...100°, рис. 3, на участке размером 2,0...3,0 мм приводит к формированию областей с различными тепловыми свойствами. Это обусловливает неравномерный износ рабочего участка режущей кромки.
2. Большие температурные градиенты по всей длине режущей кромки, рис. 2, при высоких значениях коэффициента линейного расширения, могут привести к появлению микротрещин на рабочем участке резца.
3. При повышенном износе режущей кромки, преимущественно в окрестности точек В и С, рис. 1, происходит выравнивание профиля температур, рис. 4. Переход от вогнутой формы распределения температуры вдоль режущей кромки к выпуклой может быть условием (критерием) перехода в зону рискованной эксплуатации резца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шустер Л.М. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. – М.: Машиностроение, 1988. – 95 с.
2. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 317 с.
3. Теплофизические свойства вещества. Справочник / Под ред. Н.Б. Варгафтика. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 642 с.
4. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1977. – 439 с.